

На правах рукописи

ГОЛОДНОВ Антон Игоревич

**ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ
КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕДИ И МЕДНЫХ
СПЛАВОВ**

Специальность 05.16.04 - «Литейное производство»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург-2010

Работа выполнена в Государственном общеобразовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский государственный технический университет–УПИ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Мысик Раиса Константиновна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Смолко Виталий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент
Поль Виктор Борисович

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Магнитогорский
государственный технический
университет имени Г. И. Носова»

Защита состоится 26 марта 2010 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 при Государственном общеобразовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский государственный технический университет–УПИ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» в зале Ученого Совета (ауд. I) по адресу: 620002, г. Екатеринбург, К-2, ул. Мира, 19, УГТУ-УПИ.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, К-2, ул. Мира, 19, УГТУ-УПИ, ученому секретарю. Факс: (343) 374-38-84, 374-53-35. E-mail: kafedralp@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного общеобразовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский государственный технический университет–УПИ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Автореферат разослан 24 февраля 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
профессор, доктор технических наук

Карелов С. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время во всех отраслях промышленности широко используется продукция из меди и сплавов на основе меди. Среди металлов медь занимает особое место благодаря высокой электропроводности и теплопроводности. По электропроводности медь уступает только серебру и поэтому является важнейшим проводниковым материалом. Она обладает высокой коррозионной стойкостью и технологичностью, что обуславливает ее широкое применение в промышленности как в чистом виде, так и в виде сплавов.

Основной объем меди и сплавов на основе меди потребляется промышленностью в виде деформированных полуфабрикатов, производство которых непрерывно растет. Научно-технический прогресс в отраслях промышленности, использующих медь и медные сплавы, вызывает непрерывное повышение требований к качеству деформированных полуфабрикатов и деталей, изготавливаемых из медного проката.

Получение качественных слитков из меди и кадмиевой бронзы БрКд1 связано с определенными трудностями. В процессе производства литых заготовок имеет место значительная доля брака по причине образования внутренних и поверхностных дефектов. При литье меди в слитках, как правило, формируется крупнозернистая столбчатая структура, обладающая большой анизотропией свойств, а при литье кадмиевой бронзы имеет место обратная ликвация кадмия, приводящая к неоднородности химического состава и, как следствие, к неравномерности механических свойств по сечению слитка. Появление ликвата на поверхности слитков приводит к преждевременному износу гильзы кристаллизатора и значительно снижает качество поверхности слитка.

Для повышения технологичности сплава необходимо при литье обеспечить равномерное распределение легирующего компонента по сечению слитка, а также получить благоприятную с точки зрения пластической обработки структуру литых заготовок. Одним из способов решения вышеперечисленных проблем является применение вибрационной обработки расплава в кристаллизаторе при непрерывном и полунепрерывном литье.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что исследование влияния вибрационной обработки на структуру и свойства меди и медных сплавов, а также разработка технологического регламента полунепрерывного литья слитков из этих сплавов с использованием вибрационного воздействия на расплав в кристаллизаторе является в настоящее время важной и актуальной.

Цель работы

Исследование особенностей формирования структуры и свойств слитков меди и медных сплавов, склонных к ликвации и образованию трещин, при вибрационном воздействии на расплав в процессе кристаллизации при полунепрерывном литье.

Основное внимание было уделено решению следующих задач:

- исследованию влияния вибрации на формирование структуры и свойств меди и кадмиевой бронзы БрКд1;
- определению оптимальных параметров вибрации, обеспечивающих получение мелкокристаллической структуры и высокий уровень механических свойств медных сплавов;
- разработке технологического регламента полунепрерывного литья медных сплавов с применением вибрации, позволяющей получать качественные литые заготовки.

Научная новизна

1. Установлены и обоснованы параметры вибрационного воздействия на кристаллизующийся расплав меди и кадмиевой бронзы БрКд1, обеспечивающие формирование мелкокристаллической структуры, снижение ликвации в слитках и повышение уровня механических свойств.
2. Получены регрессионные зависимости параметров структуры и свойств меди от частоты и амплитуды вибрации.
3. Установлена закономерность распределения кадмия по сечению слитков кадмиевой бронзы БрКд1 при вибрационной обработке расплава в процессе полунепрерывного литья.
4. Уточнены и расширены представления о механизме вибрационного воздействия на кристаллизующийся расплав.

Практическая значимость работы

Разработаны технологические режимы наполнительного и полунепрерывного литья слитков меди и кадмиевой бронзы БрКд1 с использованием вибрационного воздействия на расплав в процессе кристаллизации, обеспечивающие формирование мелкозернистой кристаллической структуры и высокого уровня механических свойств. Технологические регламенты литья меди и кадмиевой бронзы с применением вибрации прошли промышленные испытания на ОАО «Ревдинский завод по обработке цветных металлов»

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на XIV отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», г. Екатеринбург, 2008 г., научно-практической конференции «Литейное производство сегодня и завтра», г. Санкт-Петербург, 2008 г., V Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», г. Москва, 2009 г., Международной конференции «Создание новых материалов для эксплуатации в экстремальных условиях», г. Якутск, 2009 г.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 8 печатных работ, 3 из которых в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, библиографического списка из 121 наименований и приложений, изложена на 151 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка, 27 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, приведены основные научные положения, выносимые на защиту, а также показана практическая значимость результатов работы.

Глава 1. Состояние вопроса

В главе представлен обзор технической литературы, касающейся проблемы получения качественной продукции из медных сплавов, содержащих в своем составе легкоокисляющиеся и легкоиспаряющиеся компоненты, такие как кадмий, бериллий, хром, фосфор и другие.

Получение качественных слитков из кадмиевой бронзы сопряжено с большими технологическими трудностями. Прежде всего, это большая склонность сплава к обратной ликвации. Появление кадмия на поверхности слитков приводит к износу гильзы кристаллизатора и значительно снижает качество поверхности слитка. При литье слитков кадмиевой бронзы по традиционной технологии наблюдается формирование крупной, неоднородной по сечению слитка макроструктуры. При такой структуре возрастает вероятность образования трещин в слитке и снижения механических свойств сплава. Низкая пластичность сплава в литом состоянии и обратная ликвация кадмия не позволяет прокатывать литые заготовки. Требуется введение дополнительной операции горячего прессования перед прокаткой, что приводит к повышению трудоемкости и энергозатрат, а также к снижению выхода годного при производстве полуфабрикатов из кадмиевой бронзы БрКд1.

Одним из способов снижения обратной ликвации кадмия в литых заготовках и повышения пластических свойств является измельчение макро- и микроструктуры слитков. Изменить характер структуры возможно с помощью внешних воздействий на кристаллизующийся расплав. В настоящее время известно несколько способов воздействия на расплав в процессе кристаллизации: введение в кристаллизующийся расплав микрохолодильников, электромагнитное перемешивание, вибрационная обработка и др. Достоинством этих методов является то, что они позволяют получать требуемую структуру без внесения в расплав дополнительных примесей, отрицательно влияющих на свойства сплава. В условиях непрерывного и полунепрерывного литья наиболее технологичным способом является вибрационная обработка расплава в кристаллизаторе. В результате выполненного анализа литературных данных по рассматриваемой в работе проблеме сформулированы задачи диссертационной работы.

Глава 2. Методики исследования

В ходе проведения работы использованы как методики по ГОСТ, так и оригинальные методики. Перечислены материалы и оборудование, применяемые для проведения лабораторных и промышленных экспериментов.

В процессе выполнения настоящей работы проводились эксперименты по отработке технологии вибрационного воздействия на кристаллизующийся расплав. Исследования проводились на кадмиевой бронзе БрКд1 и меди марки М2. Плавка металла осуществлялась в промышленной индукционной трехфазной одноканальной печи ИЛК–1,6. Для вибрации расплава использовали лабораторный вибростол (рис. 1).

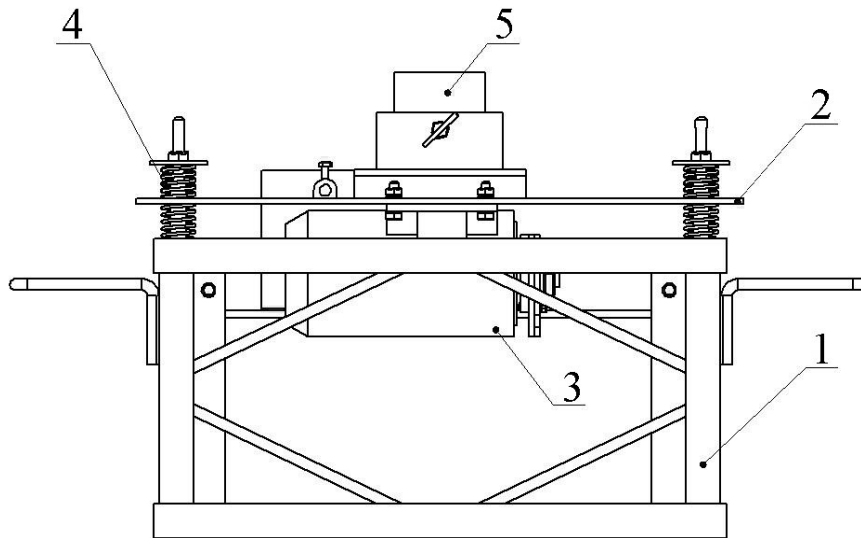


Рис. 1. Конструкция лабораторного вибростола:

1 – основание; 2 – плита; 3 – вибратор; 4 – пружина; 5 – изложница

На плиту вибростола устанавливали изложницу, предварительно подогретую до температуры 250°С. Жидкий металл, нагретый до температуры 1130°С, заливался в изложницу, совершающую колебательные движения. В лабораторных экспериментах использовали медные изложницы с диаметром рабочей полости 40 мм и 65 мм, высота полученных слитков 50 мм и 400 мм соответственно. При получении слитков диаметром 40 мм колебания прекращали через 1 – 2 минуты после заливки, а для слитков диаметром 65 мм – через 5 – 7 минут. Для оценки эффективности вибрационного воздействия заливался контрольный слиток без наложения вибрации.

Для поиска оптимальных параметров вибрации применяли последовательный симплексный метод (ПСМ). ПСМ представляет собой непараметрическую процедуру, то есть заключается в простом сравнении полученных откликов. При использовании ПСМ план эксперимента формируется из точек области исследования, расположенных в вершинах симплекса. Поскольку область исследования в нашей работе представляет собой плоскость, симплексом в данном случае является треугольник. После проведения эксперимента производится сравнение результатов, полученных в вершинах симплекса, друг с другом. В результате определяется от какой из

вершин следует отказаться прежде всего, а это уже указание на то, в каком направлении следует двигаться. Таким образом, достаточно провести один дополнительный опыт, чтобы сформировать новый симплекс и уточнить направление движения в область оптимальных значений.

Для изучения дендритного строения литых образцов использовали оптический микроскоп LECO-SA2000 со встроенной цифровой камерой SONY DVC-R500. Измерение среднего размера дендритной ячейки осуществляли с помощью программного продукта SIAMS Photolab 700.

Глава 3. Влияние вибрации на структуру и свойства меди

Вибрационной обработке кристаллизующегося расплава посвящено множество работ. Хорошо известно, что такого рода воздействие оказывает положительное влияние на процесс формирования мелкокристаллического строения литых заготовок. Однако в настоящее время не определены параметры вибрации, позволяющие влиять на кристаллическую структуру меди и медных сплавов. Кроме того, не существует однозначного мнения о механизме влияния вибрации на процесс кристаллизации металлов и сплавов.

Поскольку при литье кадмиевой бронзы существуют определенные трудности, связанные с токсичностью и низкой температурой кипения кадмия, первоначально лабораторные эксперименты проводились на модельном металле. Кадмиевая бронза по теплофизическим свойствам незначительно отличается от меди, поэтому в качестве модельного металла была использована медь марки М2.

Поиск оптимальных параметров проводили с помощью последовательного симплексного метода. Вибрация может осуществляться с различными параметрами. Применение ультразвуковой и высокочастотной вибрации негативно влияет на здоровье обслуживающего персонала и приводит к преждевременному выходу из строя оборудования. Кроме того, вибрация водоохлаждаемого кристаллизатора с высокой частотой может приводить к возникновению кавитационных процессов в воде, что приведет к резкому снижению теплоотвода от гильзы кристаллизатора. В связи с этим в работе исследовали влияние низкочастотной вибрации (0 – 50 Гц). Для определения оптимальных параметров вибрации необходимо определить начальную точку, то есть значения параметров, от которых мы начнем продвигаться в сторону лучших значений, и установить шаг варьирования для каждого параметра. За исходную точку приняли амплитуду колебаний $A = 0,5$ мм и частоту колебаний $\nu = 5$ Гц. За шаг варьирования частоты принято значение 5 Гц, а амплитуды – 0,25 мм. На основании исходных данных был сформирован план первого эксперимента, который представлен в табл. 1.

Таблица 1

Параметры опытов в вершинах симплекса №1

Номер опыта	A, мм	ν , Гц
1	0,25	10
2	0,75	10
3	0,5	2,5

Поскольку цель эксперимента заключалась в определении оптимальных параметров, позволяющих получать медные слитки с мелкой, однородной по их сечению структурой, в качестве параметра оптимизации выбрана доля столбчатых кристаллов в структуре медных слитков Z . Кроме доли столбчатых кристаллов в структуре слитков контролировалась средняя площадь сечения зерна S . Результаты металлографического исследования слитков меди, полученных в ходе трех первых опытов и контрольного слитка представлены в табл. 2

Таблица 2

Результаты металлографического анализа слитков меди

Номер опыта	Z , %	S , мм ²
1	94	2,53
2	64	1,89
3	89	2,32
Без вибрации	100	3,67

Согласно табл. 2 вибрационное воздействие на кристаллизующуюся медь с параметрами, приведенными в табл. 1, оказывает положительное влияние на структуру меди. Так, на всех полученных образцах доля столбчатых кристаллов и средняя площадь зерна меньше, чем в контрольном слитке. Наихудший результат наблюдается в опыте №1, где доля столбчатых кристаллов составила 94%. На основании сравнения полученных результатов определены параметры вибрации для опыта №4. В результате формируется новый симплекс. Таким образом, происходит перемещение в факторном пространстве в сторону оптимальных параметров. Схема перемещения симплексов в факторном пространстве представлена на рис. 2. Результаты экспериментов представлены в табл. 3.

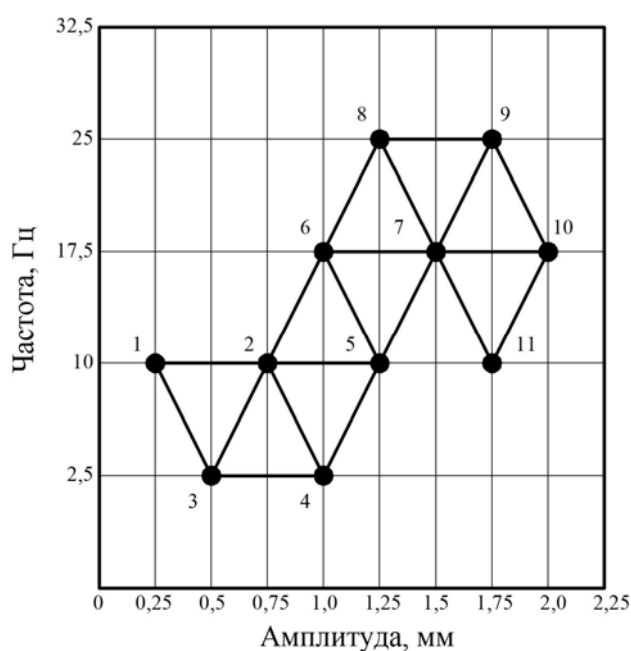


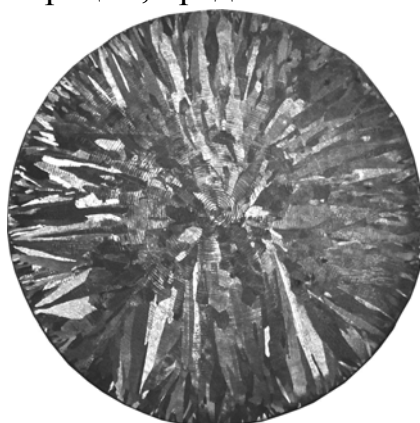
Рис. 2. Схема перемещения симплексов в процессе поиска оптимальных параметров вибрационного воздействия на кристаллизующийся расплав меди

Таблица 3

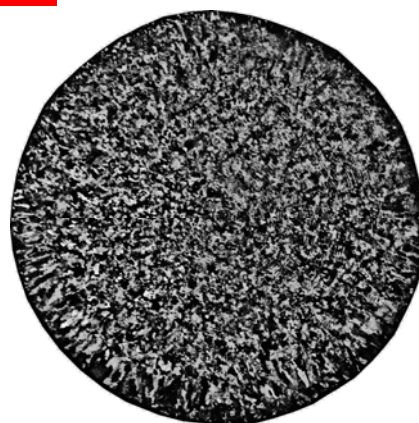
**Результаты экспериментов по поиску оптимальных параметров
вибрационного воздействия на медь**

Номер опыта	A, мм	ν , Гц	Z, %	S, мм ²
4	1	2,5	70,5	2,04
5	1,25	10	60,5	1,7
6	1	17,5	37	1,2
7	1,5	17,5	0	0,98
8	1,25	25	44,8	1,6
9	1,75	25	37,1	1,3
10	2	17,5	31,1	1,09
11	1,75	10	58,6	1,6

В ходе эксперимента обнаружено заикливание симплексов вокруг точки №7. Исходя из этого, можно заключить, что параметры вибрации, соответствующие точке №7 ($\nu = 17,5$ Гц, $A = 1,5$ мм), являются оптимальными. При этом полностью устраняется зона столбчатых кристаллов, а средняя площадь сечения зерна в структуре медных слитков сокращается почти в 4 раза. Макроструктура контрольного слитка меди и слитка, отлитого под воздействием вибрации, представлены на **рис. 3**



Без вибрации
Z=100 %
S=3,67 мм²



С применением вибрации
 $\nu = 17,5$ Гц, $A = 1,5$ мм
Z=0%
S=0,98 мм²

Рис. 3. Макроструктура медных слитков диаметром 40 мм

Для более детального изучения влияния вибрации с установленными параметрами на процесс кристаллизации меди, а также на ее механические свойства провели новый эксперимент. Для установления зависимостей параметров структуры и уровня механических свойств меди от частоты и амплитуды колебаний был составлен план эксперимента, в котором частота изменялась в интервале 15 – 23 Гц, а амплитуда – в интервале 0,5 – 1,5 мм, находящихся вблизи оптимальных значений. Для обработки экспериментальных данных использовали регрессионный анализ. Усредненные результаты проведенных исследований представлены в **табл. 4**.

Таблица 4

Результаты металлографического анализа структуры медных слитков и механические свойства меди при различных параметрах вибрации

Частота, Гц	Амплитуда, мм	Доля столбчатых кристаллов Z, %	Средняя площадь зерна S, мм ²	Средний размер дендритной ячейки L, мкм	Временное сопротивление разрушению при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость HV
Без вибрации		100	8	9,133	169,1	32,1	35,4
15	0,5	63,8	5,3	5,967	183,8	36,6	39,9
15	2,5	47,1	4,1	6,067	181,3	42,6	44,5
19	1	7,6	2,3	2,312	214	52,6	51,3
19	1,5	0,2	0,52	2,433	234,3	55,4	55,7
19	2	7,1	1,3	2,519	214,5	54,4	52,4
21	1	8,3	2,5	2,499	199,5	53,4	49,5
21	2	8,7	4,4	2,521	198,3	52,9	49,9
23	0,5	98,5	8,9	6,867	177,8	38,6	44,7
23	2,5	49,7	5,2	6,767	183,8	42,8	43,3

После математической обработки экспериментальных данных получены следующие закономерности влияния параметров вибрации на структуру и механические свойства меди:

$$Z = 297,619 - 20,155 \cdot n - 164,799 \cdot A - 1,751 \cdot n \cdot A + 0,652 \cdot n^2 + 61,774 \cdot A^2,$$

$$S = 47,052 - 4,555 \cdot n - 6,705 \cdot A - 0,106 \cdot n \cdot A + 0,133 \cdot n^2 + 2,625 \cdot A^2,$$

$$L = 47,603 - 4,252 \cdot n - 8,250 \cdot A - 0,012 \cdot n \cdot A + 0,114 \cdot n^2 + 2,837 \cdot A^2.$$

$$\sigma_{\text{в}} = -181,251 + 38,315 \cdot n + 59,388 \cdot A + 0,488 \cdot n \cdot A - 1,049 \cdot n^2 - 22,712 \cdot A^2$$

$$\epsilon = -93,014 + 12,372 \cdot n + 38,031 \cdot A - 0,151 \cdot n \cdot A - 0,315 \cdot n^2 - 10,993 \cdot A^2$$

$$HV = -62,254 + 9,754 \cdot n + 28,322 \cdot A - 0,367 \cdot n \cdot A - 0,239 \cdot n^2 - 6,826 \cdot A^2$$

Представленные зависимости позволили уточнить оптимальные параметры вибрации, под воздействием которых формируется мелкокристаллическая структура меди и повышаются механические свойства медных слитков. Также были определены параметры вибрации, позволяющие получить оптимальные значения исследуемых откликов. Результаты расчетов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Расчетные значения оптимальных параметров вибрации

Наименование отклика	Значение отклика	Частота, Гц	Амплитуда, мм
Доля столбчатых кристаллов, %	1,023±0,693	17,586	1,538
Средняя площадь зерна, мм ²	0,941±0,716	17,835	1,638
Средний размер дендритной ячейки, мкм	1,680±0,817	18,697	1,495
Временное сопротивление разрушению при растяжении, МПа	246,237±3,685	18,613	1,507
Относительное удлинение, %	56,385±1,991	19,237	1,598
Твердость HV	57,313±3,062	19,233	1,558

Установлено, что наиболее эффективной является вибрация с частотой $\nu = 17 - 19$ Гц и амплитудой $A = 1,5 - 1,6$ мм. Ожидалось, что в результате вибрационного воздействия с такими параметрами на кристаллизующуюся медь удастся максимально измельчить макро- и микроструктуру слитков, что позволит значительно повысить механические свойства литой меди. Для проверки расчетных данных был отлит слиток с применением вибрационной обработки с частотой $\nu = 18$ Гц и амплитудой $A = 1,5$ мм. Макро- и микроструктура слитка представлена на **рис. 4**.

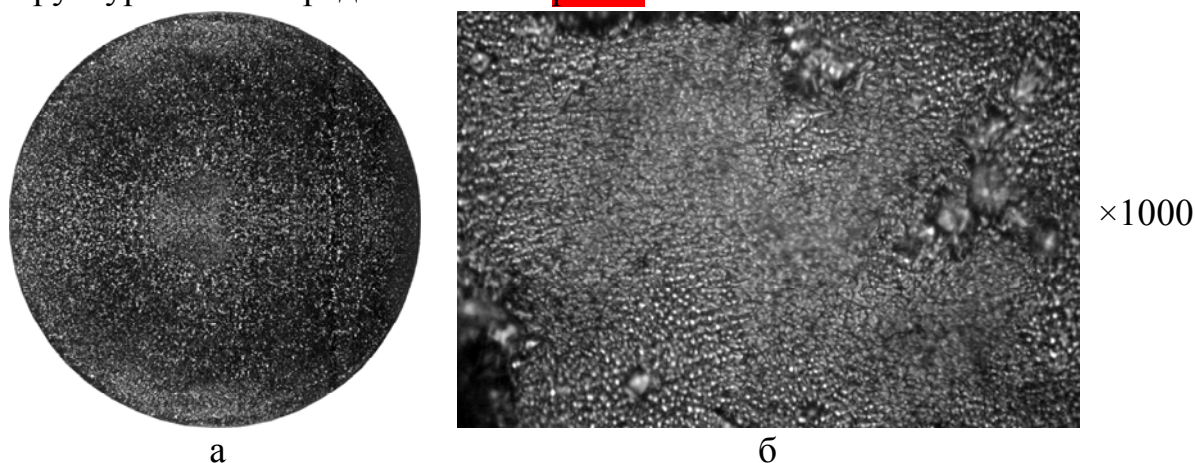


Рис. 4. Макроструктура (а) и микроструктура (б) слитка меди, полученного с применением вибрационной обработки расплава

Металлографический анализ структуры слитка показал, что при таких параметрах вибрации формируется равномерная структура, зерна мелкие, равноосные, со средней площадью $0,43 \text{ мм}^2$, средний размер дендритной ячейки составляет $1,8 \text{ мкм}$. Механические испытания образцов, вырезанных из слитка, показали, что временное сопротивление разрушению при растяжении равно $253,1 \text{ МПа}$, относительное удлинение равно $59,3 \%$, твердость по Виккерсу HV составила $57,4$, что подтверждает полученные расчетные данные.

Сравнение структуры контрольного слитка и слитка, отлитого с применением вибрации с частотой $\nu = 18$ Гц и амплитудой $A = 1,5$ мм, показало, что вибрационная обработка кристаллизующейся меди позволяет полностью устранить зону столбчатых кристаллов в структуре слитков, при этом средняя площадь макрозерна уменьшается в $18,5$ раз, а средний размер дендритной ячейки уменьшается в 5 раз. Кроме того, вибрационная обработка позволяет значительно повысить механические свойства литой меди. Так, временное сопротивление разрушению при растяжении возрастает в $1,5$ раза, относительное удлинение – в $1,8$ раза, а твердость – в $1,6$ раза.

Известно, что литая медь и медные сплавы обладают большой анизотропией свойств. Поэтому важно не только повысить уровень механических свойств меди, но и обеспечить равномерное распределение их по сечению слитка. Провели исследование влияния вибрации на механические свойства и параметры структуры меди по сечению слитка. Результаты представлены в **табл. 6**.

Таблица 6

Изменение параметров структуры и твердости меди по сечению слитка

Исследуемая характеристика	Без вибрации			С применением вибрации $\nu = 18$ Гц, $A = 1,5$ мм		
	Край	$\frac{1}{2}R$	Центр	Край	$\frac{1}{2}R$	Центр
Средняя площадь зерна, мм ²	12	10,9	10,2	0,56	0,5	0,48
Средний размер дендритной ячейки, мкм	12	8,6	6,4	2,9	2,3	2,1
Твердость HV	33,1	38,2	41,9	53,9	56,9	58,7

Установлено, что при вибрационном воздействии на кристаллизующуюся медь с частотой $\nu = 18$ Гц и амплитудой $A = 1,5$ мм удается не только значительно повысить ее механические свойства, но и добиться равномерности их распределения по сечению слитка. Это объясняется формированием мелкозернистой структуры по сечению слитка. Результаты металлографического анализа и испытания механических свойств медных слитков находятся в полном соответствии.

В настоящее время не существует однозначного мнения о влиянии вибрации на процесс кристаллизации расплава. Из анализа литературных источников следует, что вибрационная обработка расплава приводит к интенсивному зарождению новых кристаллов. При этом выделяется два основных механизма динамического зарождения кристаллов под действием вибрации. В первом случае в жидкости протекает процесс спонтанного зарождения кристаллов, обусловленного переохлаждением. В другом случае под действием вибрации резко возрастает число кристаллов в затвердевающей жидкости за счет дробления уже существующих кристаллов.

Из всех теорий, рассматривающих процесс спонтанного зарождения кристаллов под действием вибрации, можно выделить два основных направления. Теории Дж. Л. Уолкера и А.Н. Фридмана, из которых следует, что вибрационная обработка расплава вызывает в нем увеличение давления, повышая тем самым фактическое переохлаждение расплава, что приводит к увеличению скорости зарождения центров кристаллизации в расплаве. И теория, представленная в работах В.М. Говоркова и К.Н. Шабалина, согласно которой при динамическом воздействии вибрации на расплав зародыши вследствие большей плотности по сравнению с жидким металлом получают отличные от него ускорения и должны быть выбиты из тех мест, где они возникли. Таким образом, благодаря инерционному смещению частиц твердой фазы происходит разрушение барьеров (тепловых и концентрационных), которые формируются вокруг зародышей при их возникновении, что облегчает процесс их дальнейшего роста. Установленные оптимальные параметры вибрации ($A = 1,5$ мм; $\nu = 18$ Гц) позволяют оценить значимость представленных процессов при вибрационной обработке расплава меди.

Известно, что изменение температуры плавления, вызванное колебанием давления, можно вычислить по уравнению Клапейрона. Согласно этому уравнению для увеличения температуры плавления меди хотя бы на 0,17 К

требуется давление равное 3000 кПа (30 атм). По предположению, выдвинутому Дж. Л. Уолкером, добиться такого существенного повышения давления в жидком металле можно только при захлопывании кавитационных пустот. Согласно работам А.Н. Фридмана при вибрационной обработке жидкой меди с оптимальными параметрами в изложницах высотой 400 мм максимально возможное изменение давления жидкой меди на фронт кристаллизации составит 70 кПа, что позволит увеличить температуру плавления меди на 0,004 К. Таким образом, колебание давления в жидкой меди при оптимальных параметрах вибрации не оказывает существенного влияния на процесс формирования кристаллического строения медных слитков и измельчение структуры слитков, по-видимому, происходит по другим причинам.

В работе В.М. Говоркова представлена формула, характеризующая зависимость смещения частицы твердой фазы от параметров вибрационного воздействия, из которой следует, что при заданных параметрах вибрации величина смещения частицы твердой фазы определяется ее размерами и вязкостью жидкости. Расчеты, проведенные на основе этой формулы, показали, что смещения твердых частиц, близких по размеру к критическому зародышу $r_{кр}=1,35$ мкм, составляют 0,0003 мкм, что крайне незначительно. Таким образом, можно заключить, что влияние вибрационного смещения твердых частиц в жидкой меди не оказывает существенного влияния на процесс формирования кристаллического строения медных слитков при установленных оптимальных параметрах вибрации.

Поскольку установленные оптимальные параметры вибрации не приводят к активному зарождению кристаллов из жидкого металла, то можно предположить, что зарождение новых кристаллов происходит за счет разрушения уже существующих кристаллов под действием вибрации.

Для определения механизма разрушения необходимо более подробно рассмотреть взаимодействие фронта кристаллизации, совершающего колебательные движения, с жидким металлом. Задача о движении вязкой несжимаемой жидкости вблизи стенки, совершающей гармонические колебания, рассматривалась еще Стоксом. Хорошо известно точное решение данной задачи на основе уравнений Навье – Стокса. Согласно этому решению скорость движения жидкости, прилегающей к стенке изложницы, совершающей гармонические колебания, изменяется по следующему закону:

$$v = v_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \eta}} \cdot x} \cdot \cos(\omega \cdot t - \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \eta}} \cdot x),$$

где v – скорость движения потока жидкости на расстоянии x от стенки изложницы, м/с; v_0 – амплитуда скорости движения стенки, м/с; ω – циклическая частота колебаний стенки, рад/с; η – кинематическая вязкость жидкости, м²/с; t – время, с.

Из формулы следует, что стенка вовлекает жидкость в колебательное движение с той же частотой ω с экспоненциально убывающей амплитудой по мере удаления от стенки. Для изучения влияния вибрационной обработки на медь в процессе кристаллизации необходимо подробно рассмотреть

взаимодействие фронта кристаллизации с возникающими потоками жидкости. Если предположить, что корка затвердевающего металла имеет плотный контакт со стенкой изложницы, то растущие дендриты в момент времени t движутся с той же скоростью v_1 , что и изложница. Таким образом, скорость движения жидкой меди v_3 относительно растущих дендритов в момент времени t определяется по формуле:

$$\begin{aligned} v_3 &= v_2 - v_1 \\ v_1 &= A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \\ v_2 &= A \cdot \omega \cdot e^{-x \cdot \sqrt{10^5 \cdot \omega}} \cdot \cos(\omega \cdot t - x \cdot \sqrt{10^5 \cdot \omega}) \\ v_3 &= A \cdot \omega \cdot (e^{-x \cdot \sqrt{10^5 \cdot \omega}} \cdot \cos(\omega \cdot t - x \cdot \sqrt{10^5 \cdot \omega}) - \cos(\omega \cdot t)) \end{aligned}$$

где t – время, с; A – амплитуда колебания изложницы, м; ω – циклическая частота колебания изложницы, рад/с; v_1 – скорость движения изложницы, м/с; v_2 – скорость движения меди на расстоянии x от стенки изложницы, м/с; v_3 – скорость движения жидкой меди относительно фронта кристаллизации, м/с.

По установленной зависимости скорости движения жидкой меди относительно фронта кристаллизации от параметров вибрации построены эпюры скоростей движения потоков жидкой меди относительно растущих дендритов при оптимальных параметрах вибрации **рис. 5**.

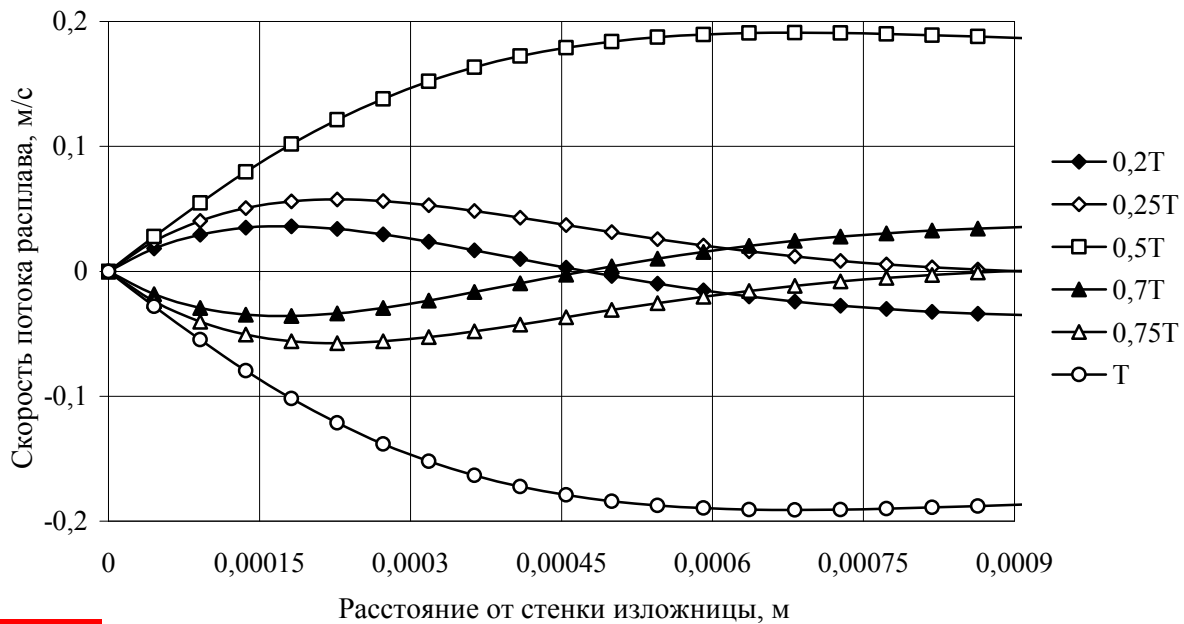


Рис. 5. Эпюры скоростей движения потоков жидкой меди относительно растущих дендритов при $A = 1,5$ мм и $\nu = 18$ Гц в различные моменты времени (T – период колебаний, с)

Из эпюр скоростей следует, что в определенные моменты времени в жидкой меди, прилегающей к фронту кристаллизации, возникают разнонаправленные потоки жидкой меди, движущиеся со скоростью v_3 относительно растущих дендритов. Поэтому при развитии достаточных скоростей потока создаются условия для срезания дендритов. Кроме того, при оптимальных параметрах вибрации могут возникать резонансные колебания растущих дендритов, что облегчает их механическое разрушение. Обломки

кристаллов подхватываются потоками, возникающими в изложнице вследствие естественной конвекции жидкого металла, и разносятся по всему объему жидкого металла. Часть обломков расплавляется, что приводит к охлаждению жидкого металла, а более крупные обломки становятся зародышами, что приводит к формированию равноосной структуры медного слитка. Исходя из вышесказанного, можно предположить, что при полунепрерывном литье меди, для которого характерна интенсивная вынужденная конвекция в лунке жидкого металла, представленные процессы будут протекать более интенсивно, чем при наполнительном литье.

Глава 4. Влияние вибрации на структуру и свойства слитков кадмиевой бронзы БрКд1

Полученные для меди экспериментальные данные были приняты за основу при проведении экспериментов для уточнения оптимальных параметров вибрационного воздействия на кадмиевую бронзу БрКд1. Поиск оптимальных параметров вибрационного воздействия проводили с помощью последовательного симплексного метода. За исходную точку приняли амплитуду колебаний $A = 1$ мм и частоту колебаний $\nu = 26$ Гц. Шаг варьирования частоты составлял 1 Гц, а амплитуды – 0,15 мм. План первого эксперимента представлен в табл. 7.

Таблица 7

Параметры опытов в вершинах симплекса №1

Номер опыта	A, мм	ν , Гц
1	1,15	27
2	0,85	27
3	1	25

В качестве параметра оптимизации выбрали долю столбчатых кристаллов в структуре слитков кадмиевой бронзы Z. Кроме доли столбчатых кристаллов в структуре слитков бронзы БрКд1 контролировалась средняя площадь сечения зерна S. Результаты металлографического исследования опытных слитков представлены в табл. 8.

Таблица 8

Результаты металлографического анализа структуры слитков кадмиевой бронзы БрКд1

Номер опыта	Z, %	S, мм ²
1	42,6	3,98
2	28,7	2,15
3	18,8	1,96
Без вибрации	75,7	5,97

Как видно из табл. 8 вибрационное воздействие на кристаллизующийся расплав с параметрами, приведенными в табл. 7, оказывает положительное влияние на параметры структуры сплава. В структуре опытных слитков доля столбчатых кристаллов и средняя площадь сечения зерна значительно меньше,

чем на контрольном слитке. Наихудший результат наблюдается в опыте №1, где доля столбчатых кристаллов составила 42,6%. На основании сравнения полученных результатов определены параметры вибрации для опыта №4. В результате формируется новый симплекс. Схема перемещения симплексов в факторном пространстве представлена на **рис. 6**. Результаты экспериментов представлены в **табл. 9**.

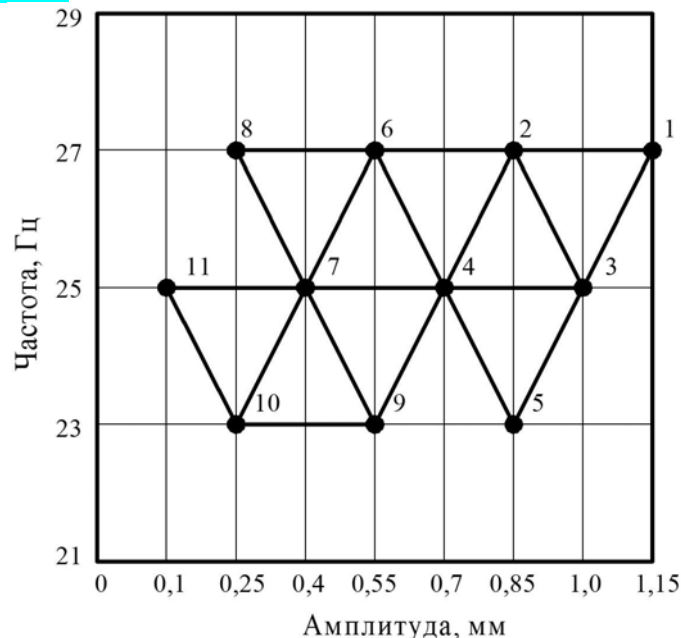


Рис. 6. Схема перемещения симплексов в процессе поиска оптимальных параметров вибрационного воздействия на кристаллизующийся расплав кадмиевой бронзы БрКд1

Таблица 9

Результаты экспериментов по поиску оптимальных параметров вибрационного воздействия на кадмиевую бронзу БрКд1

Номер опыта	A, мм	ν , Гц	Z, %	S, мм ²
4	0,7	25	15,2	1,79
5	0,85	23	61,9	3,86
6	0,55	27	11,1	1,33
7	0,4	25	0	0,6
8	0,25	27	40,5	3,05
9	0,55	23	23,9	1,79
10	0,25	23	17,2	1,47
11	0,1	25	29,8	1,77

В ходе эксперимента обнаружено заикливание симплексов вокруг точки №7. Исходя этого, можно заключить, что параметры вибрации, соответствующие точке №7 ($\nu = 25$ Гц и $A = 0,4$ мм), являются оптимальными, при этом полностью устраняется зона столбчатых кристаллов, а средняя площадь сечения зерна в структуре слитков сокращается почти в 10 раз. Макроструктура контрольного слитка бронзы БрКд1 и слитка, отлитого под воздействием вибрации с частотой $\nu = 25$ Гц и амплитудой $A = 0,4$ мм, представлена на **рис. 7**.

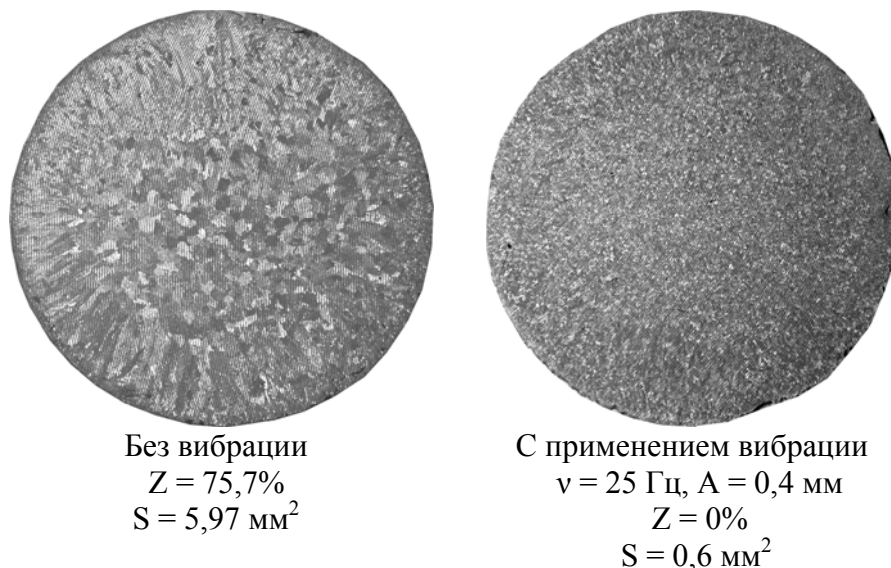


Рис. 7. Макроструктура слитков бронзы БрКд1

Кадмиевая бронза относится к сплавам, склонным к обратной ликвации. В связи с этим представляет интерес исследование этого процесса и определение реальных путей к снижению неоднородности слитка по химическому составу. Известно, что объемный характер кристаллизации и уменьшение величины зерна будут способствовать подавлению ликвационных процессов. В связи с этим исследовали влияние вибрации как на химическую однородность слитков кадмиевой бронзы БрКд1, так и на однородность макро- и микроструктуры по сечению слитка.

Анализ химической однородности проводился на слитках, полученных при определении оптимальных параметров вибрационного воздействия на кадмиевую бронзу БрКд1. Химическую однородность слитков исследовали по содержанию кадмия в пробах, отобранных послойной обточкой с усреднением навески для данного слоя, атомно-абсорбционным методом с помощью спектрофотометра «Perkin-Elmer». Относительная погрешность анализа составляла $\pm 5\%$. Для оценки степени ликвации кадмия был использован приведенный коэффициент ликвации k , равный отношению содержания кадмия в данном слое к среднему для данного слитка. Результаты исследований представлены в **табл. 10**.

Таблица 10

Изменение параметров структуры бронзы БрКд1 по сечению слитка

Исследуемая характеристика	Без вибрации			С применением вибрации $v = 25 \text{ Гц}, A = 0,4 \text{ мм}$		
	Край	$\frac{1}{2}R$	Центр	Край	$\frac{1}{2}R$	Центр
Средняя площадь зерна, мм^2	8,34	4,33	3,75	0,7	0,54	0,5
Средний размер дендритной ячейки, $\mu\text{м}$	10	6,15	4,65	1,65	1,6	1,8

Химический анализ образцов показал, что при литье слитков кадмиевой бронзы БрКд1 без вибрации коэффициент ликвации k изменяется по сечению слитка от 0,9 до 1,75, а с применением вибрационного воздействия с оптимальными параметрами ($v = 25 \text{ Гц}, A = 0,4 \text{ мм}$) – от 0,9 до 1,05. Результаты

химического и металлографического анализа свидетельствуют о том, что применение вибрации в процессе кристаллизации обеспечивает химическую и структурную однородность по сечению слитка.

Для изучения микроликвации кадмия проведен микрорентгено-спектральный анализ на микроанализаторе «САМЕВАХ» и электронная микроскопия тонких фольг. Результаты исследования представлены на **рис. 8** и **рис. 9**. Установлено, что междоусные пространства в процессе затвердевания обогащены кадмием. При обычных условиях разливки неоднородность возрастает по мере приближения к поверхности слитка. При разливке сплава с применением вибрационного воздействия распределение кадмия становится более равномерным по сечению слитка.

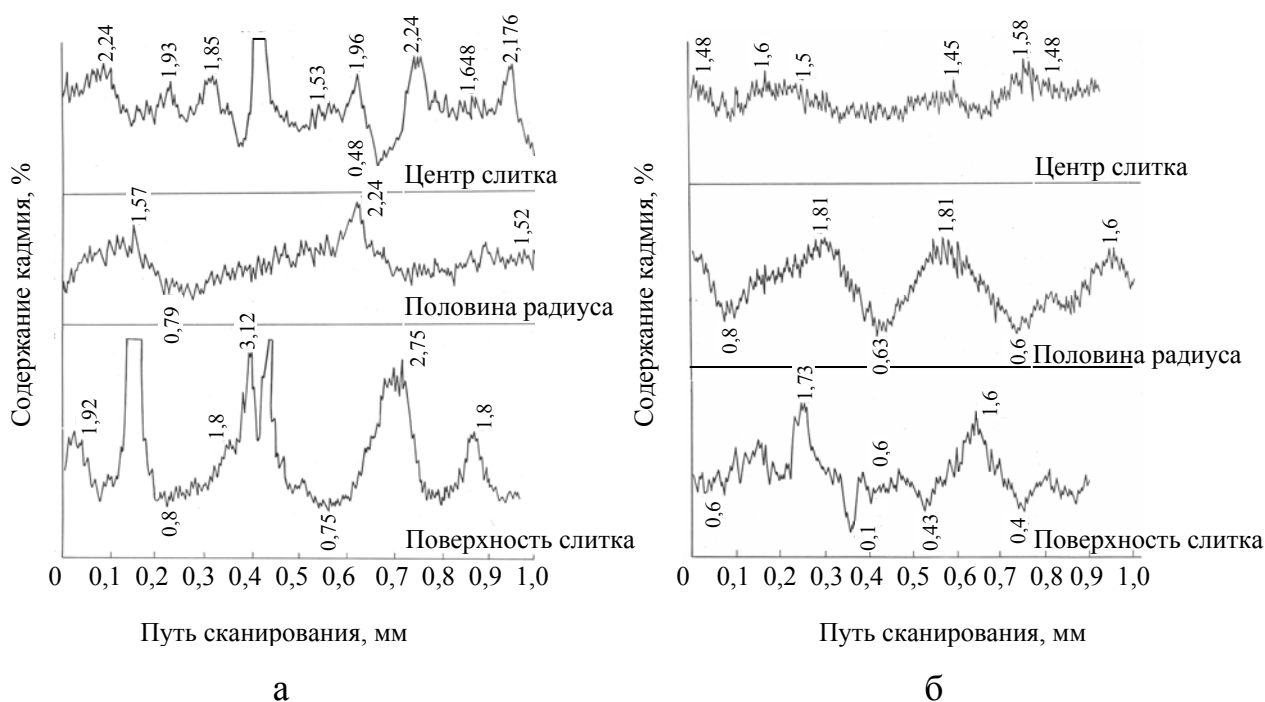
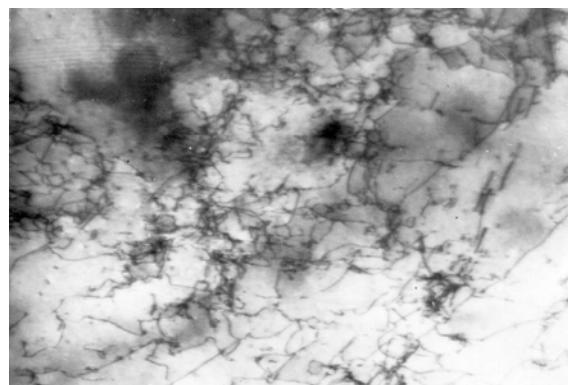


Рис. 8. Распределение кадмия по кристаллическому зерну: а – без вибрации; б – с применением вибрационного воздействия с частотой $\nu = 25$ Гц и амплитудой $A = 0,4$ мм



а



б

Рис. 9. Участки обогащения меди кадмием при литье (x25000): а – без вибрации; б – под воздействием вибрации с частотой $\nu = 25$ Гц и амплитудой $A = 0,4$ мм

Установлено, что кадмий распределен по границам зерен в виде фазы, обогащенной кадмием (содержание кадмия 66,7%). Установлено, что по мере роста зерен навстречу друг другу кадмий скапливается на соответствующих межфазных поверхностях, образуя стационарное концентрационное уплотнение. Выделение легкоплавкой эвтектики на основе соединения Cu_2Cd с температурой плавления 544 °С приводит к растрескиванию литых заготовок при прокатке вследствие оплавления границ зерен при нагреве заготовки. Установлено, что вибрационная обработка подавляет разделительную диффузию и снижает ликвацию кадмия.

Определенные в ходе экспериментов оптимальные параметры вибрационного воздействия ($\nu = 25$ Гц и $A = 0,4$ мм) были опробованы в промышленных условиях при полунепрерывном литье слитков кадмиевой бронзы БрКд1 диаметром 192 мм. Кроме того, отливали контрольные слитки без наложения колебаний.

Плавка осуществлялась в индукционной канальной печи ИЛК – 1,6. Слитки отливались в кристаллизатор высотой 200 мм с медной хромированной гильзой толщиной 10 мм с кольцевым каналом шириной 30 мм и выходом воды на слиток. Расплав в кристаллизаторе от взаимодействия с атмосферой защищался прокаленной сажей. Вибрацию создавали с помощью устройства, состоящего из плиты с кристаллизаторами и низковольтными вибраторами ИВ – 21, установленными на амортизирующих прокладках на столе литейной машины. Управление режимами вибрации производилось тиристорным преобразователем ТПЧ – 40. Параметры вибрации кристаллизаторов определялись с помощью вибрографа ВР – 1А. Технологические параметры литья были одинаковы во всех опытах и составляли: $T_{\text{литья}} = 1170 - 1190$ °С, $V_{\text{литья}} = 8 - 8,5$ м/ч, $P_{\text{воды в кр.}} = 30 - 50$ кПа.

Для определения профиля и глубины лунки жидкого металла производилась заливка свинца в кристаллизатор в конце литья. Качество слитков оценивалось по состоянию поверхности и химической однородности сплава по сечению слитка. Для оценки степени ликвации кадмия был использован приведенный коэффициент ликвации k . Состояние поверхности слитков оценивалось визуально с фиксацией наличия различных дефектов. В ходе металлографического анализа поперечных темплетов слитков определялся средний размер зерна и дендритной ячейки. Результаты исследований представлены в табл. 11

Таблица 11

Изменение параметров структуры и механических свойств бронзы БрКд1 по сечению слитка диаметром 192 мм

Исследуемая характеристика	Без вибрации			С применением вибрации $\nu = 25$ Гц, $A = 0,4$ мм		
	Край	$\frac{1}{2}R$	Центр	Край	$\frac{1}{2}R$	Центр
Средний размер зерна, мм	1,4	2	3,6	0,11	0,6	1,12
Средний размер дендритной ячейки, мкм	69	41	30	60	44	27
Временное сопротивление разрушению при растяжении, МПа	195	210	235	246	253	259
Относительное удлинение, %	36	41	45	45	46	47
Твердость НВ	84,9	61,4	58,1	81,3	78,7	77,3
Коэффициент ликвации k	1,65	1,06	0,91	1,19	1,01	1

Установлено, что применение вибрации способствует уменьшению глубины лунки жидкого металла с 200 мм до 150 мм. При этом скорость нарастания твердой корочки увеличивается, что приводит к уменьшению среднего размера зерна и дендритной ячейки, а также к снижению обратной ликвации кадмия. Снижение обратной ликвации кадмия позволяет исключить из технологического процесса операцию обточки слитка с целью удаления обогащенного кадмием поверхностного слоя, что позволяет увеличить выход годного на 5 – 10 %. Установлено, что измельчение структуры сплава приводит к значительному повышению его механических свойств.

Механизм вибрационного воздействия на процесс кристаллизации кадмиевой бронзы при полунепрерывном литье связан с разрушением фронта кристаллизации под действием колебательного движения жидкого металла вдоль фронта кристаллизации. Схема формирования структуры слитка представлена на **рис. 10**.

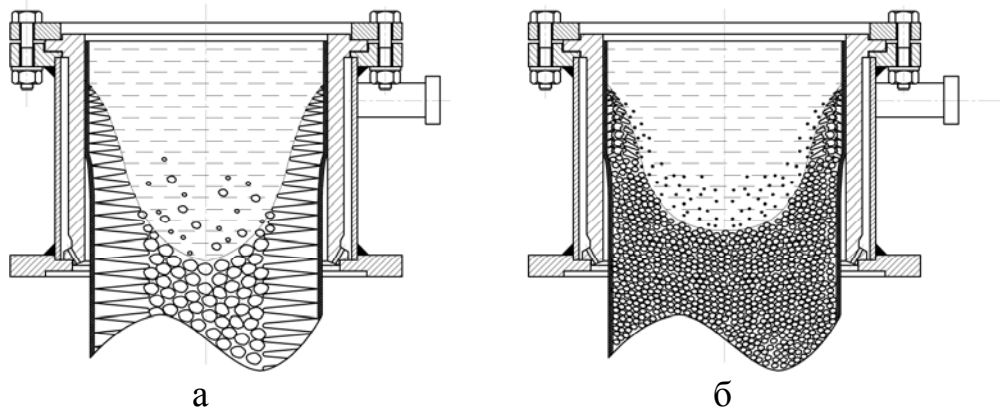


Рис. 10. Схема формирования структуры слитка кадмиевой бронзы при полунепрерывном литье: а – без вибрации; б – под воздействием вибрации

Обламывание растущих дендритов происходит за счет возникновения разнонаправленных потоков жидкой кадмиевой бронзы БрКд1 относительно растущих дендритов. Эпюры скоростей потоков жидкого металла вдоль фронта кристаллизации представлены на **рис. 11**.

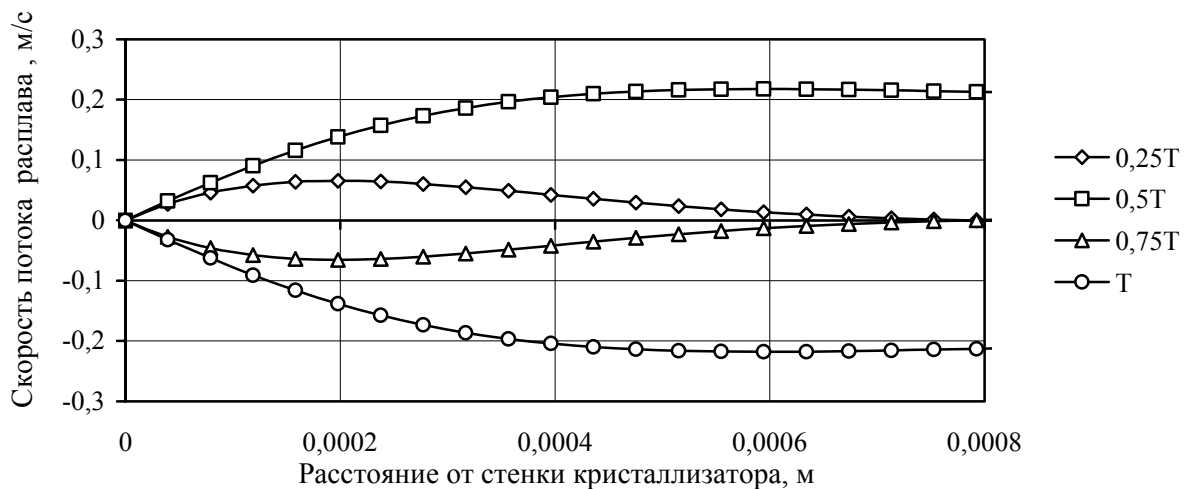


Рис. 11. Эпюры скоростей потоков жидкого металла вдоль фронта кристаллизации, возникающие при вибрации кристаллизатора при литье кадмиевой бронзы БрКд1

Существенной проблемой при полунепрерывном литье кадмиевой бронзы является образование на поверхности слитка складок значительной глубины. В ходе экспериментов установлено, что в зоне начала формирования твердой корочки за счет испарения кадмия в период затвердевания сплава происходит образование конденсата кадмия на гильзе кристаллизатора. Кадмий, оседающий на стенке кристаллизатора, увеличивает трение слитка о стенку кристаллизатора и приводит к периодическому разрыву формирующейся корочки слитка и попаданию в образующийся зазор расплава, который не полностью сваривается с затвердевшей корочкой и образует складку на поверхности слитка.

При применении вибрации кристаллизаторов с частотой $\nu = 25$ Гц и амплитудой $A = 0,4$ мм образования конденсатных отложений на стенках кристаллизатора не наблюдается, за счет этого уменьшается вероятность образования складок, поперечных трещин, надрывов на поверхности слитка. Помимо этого, снижается трение слитка о стенки кристаллизатора и увеличивается срок эксплуатации кристаллизатора **рис. 12**.

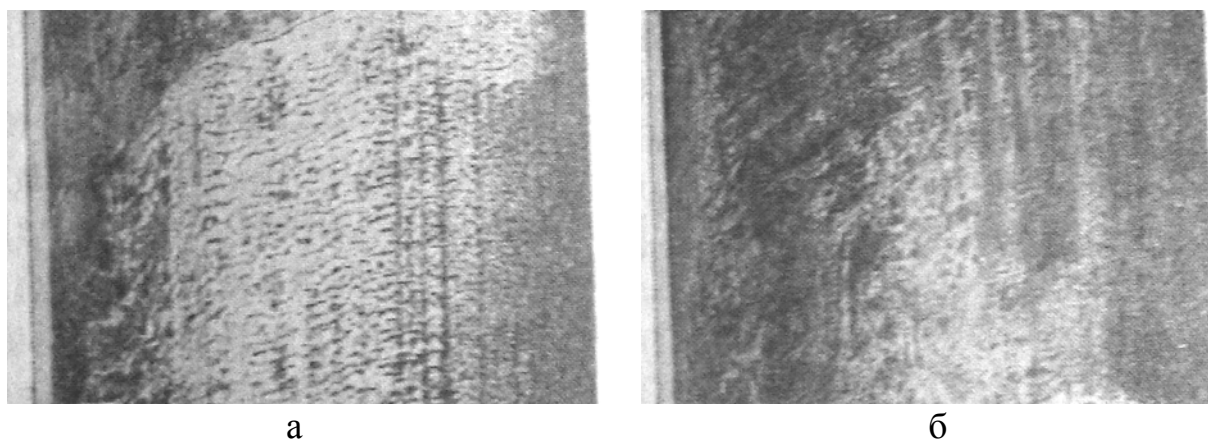


Рис. 12. Поверхность слитков кадмиевой бронзы диаметром 192 мм, отлитых со скоростью 8 м/ч: а – без вибрации; б – $\nu=25$ Гц, $A=0,4$ мм

Результаты выполненного исследования положены в основу разработки технологического регламента полунепрерывного литья слитков кадмиевой бронзы БрКд1, обеспечивающего получение качественных литых заготовок без поверхностных и внутренних дефектов, с мелкой однородной равноосной структурой, с равномерным распределением кадмия и механических свойств по сечению слитка. Рекомендуются следующие технологические параметры полунепрерывного литья слитков кадмиевой бронзы диаметром 192 мм: температура литья $T_{\text{л}} = 1170 - 1190$ °С, скорость литья 8 – 8,5 м/ч, давление воды в кристаллизаторе 30 – 50 кПа, частота колебаний кристаллизатора 24 – 26 Гц и амплитуда колебаний кристаллизатора 0,3 – 0,5 мм. Предложенный технологический регламент прошел испытания на ОАО «Ревдинский завод по обработке цветных металлов» и рекомендован к внедрению на ряде заводов по обработке цветных металлов.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. В ходе планируемого при помощи последовательного симплекс метода поискового эксперимента установлены диапазоны параметров вибрации (частота и амплитуда), позволяющие предотвратить формирование зоны столбчатых кристаллов в структуре слитков меди диаметром 40 мм. Показано, что при вибрационной обработке с частотой $\nu = 15 - 23$ Гц и амплитудой $A = 0,5 - 2,5$ мм устраняется транскристаллизация в структуре медных слитков.

2. При помощи регрессионного анализа экспериментальных данных выведены эмпирические зависимости доли столбчатых кристаллов, средней площади сечения зерна, среднего размера дендритной ячейки в структуре слитков меди диаметром 65 мм, полученных наполнительным литьем, временного сопротивления разрушению при растяжении, относительного удлинения и твердости меди по Виккерсу от параметров вибрации. Без наложения вибрации на расплав меди средняя площадь сечения зерна в структуре медных слитков диаметром 65 мм составляет 8 мм^2 , размер дендритной ячейки равен $9,133 \text{ мкм}$, а вибрационная обработка расплава с частотой $\nu = 18$ Гц и амплитудой $A = 1,5$ мм позволяет снизить эти параметры до $0,43 \text{ мм}^2$ и $1,8 \text{ мкм}$ соответственно. При этом временное сопротивление разрушению увеличивается с $169,1$ до $253,1$ МПа, относительное удлинение с $32,1$ до $59,3\%$, а твердость по Виккерсу с $35,4$ до $57,7 \text{ HV}$. Кроме того, наблюдается выравнивание параметров структуры и механических свойств меди по сечению слитка.

3. В ходе лабораторного эксперимента установлены параметры вибрации ($\nu = 25$ Гц, $A = 0,4$ мм), позволяющие устранить зону столбчатых кристаллов в структуре литой бронзы БрКд1. При этом средняя площадь сечения зерна в структуре слитка бронзы БрКд1 диаметром 40 мм без наложения вибрации составляет $5,97 \text{ мм}^2$, а с вибрационной обработкой – $0,6 \text{ мм}^2$, средний размер дендритной ячейки равен $6,93$ и $1,68 \text{ мкм}$ соответственно.

4. Микрорентгеноспектральный анализ с помощью микроанализатора «САМЕВАХ» показал, что при вибрационной обработке с частотой $\nu = 25$ Гц и амплитудой $A = 0,4$ мм подавляется разделительная диффузия кадмия и тем самым снижается внутридендритная микроликвация в слитках БрКд1. Химический анализ промышленных слитков бронзы БрКд1 диаметром 192 мм, полученных полунепрерывным литьем, свидетельствует о том, что при вибрационной обработке снижается обратная ликвация кадмия. Установлено, что при наложении вибрации с частотой $\nu = 25$ Гц и амплитудой $A = 0,4$ мм коэффициент ликвации кадмия k изменяется по сечению слитка от $0,91$ до $1,65$, а в контрольном слитке, отлитом без вибрации – от 1 до $1,19$.

5. Промышленными экспериментами установлено, что формирование твердой корочки в слитке при непрерывном литье кадмиевой бронзы начинается не с мениска расплава в кристаллизаторе, а на глубине 20 мм с существованием зоны плотного контакта жидкого металла со стенкой кристаллизатора. Применение вибрации с частотой $\nu = 25$ Гц и амплитудой $A = 0,4$ мм при полунепрерывном литье слитков из бронзы БрКд1 диаметром

192 мм способствует уменьшению глубины лунки жидкого металла до 150 мм, в то время как без вибрации она составляет 200 мм.

6. Результаты металлографического анализа промышленных слитков показали, что при вибрационной обработке измельчается макро- и микроструктура бронзы БрКд1. Показано, что при вибрации с частотой $\nu = 25$ Гц и амплитудой $A = 0,4$ мм средняя площадь сечения зерна в структуре бронзы БрКд1 составляет $0,6 \text{ мм}^2$, а средний размер дендритной ячейки 36 мкм, тогда как в слитках, полученных без вибрации эти показатели составляют 2 мм и 47 мкм соответственно. При этом применение вибрации кристаллизатора в процессе полунепрерывного литья кадмиевой бронзы БрКд1 позволяет получать слитки с равномерными структурой и свойствами по их сечению.

7. Результаты промышленных экспериментов показали, что при вибрационной обработке бронзы БрКд1 с частотой $\nu = 25$ Гц и амплитудой $A = 0,4$ мм практически полностью устраняются все поверхностные дефекты – складчатость, поперечные трещины, надрывы и поверхность становится гладкой, что позволяет повысить технологический выход годного на 5 – 10 % за счет исключения из технологического процесса операции обточки слитков перед обработкой давлением.

8. Полученные экспериментальные данные положены в основу разработки технологического регламента полунепрерывного литья меди и бронзы с применением вибрационной обработки расплава в процессе кристаллизации. Параметры вибрационной обработки меди следующие: частота $\nu = 18 - 19$ Гц, амплитуда $A = 1,4 - 1,6$ мм, а кадмиевой бронзы – частота $\nu = 24 - 26$ Гц, амплитуда $A = 0,3 - 0,5$ мм. Установлено, что применение данной технологии существенно повышает качество получаемых слитков за счет снижения брака по горячим трещинам, ликвации и поверхностным дефектам. Технология прошла промышленные испытания на ОАО «Ревдинский завод по обработке цветных металлов» и рекомендована к внедрению на ряде заводов по обработке цветных металлов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Мысик, Р. К. Использование вибрационной обработки при производстве стальных отливок / Р. К. Мысик, С. В. Брусницын, И. А. Груздева, А. И. Голоднов // Научные труды XIV отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ–УПИ. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2008. – Ч1. – С. 30-33.

2. Мысик, Р. К. Применение вибрационной обработки для снятия напряжений в стальных отливках / Р. К. Мысик, С. В. Брусницын, А. В. Сулицин, И. А. Груздева, А. И. Голоднов // Сб. тезисов докладов конференции «Литейное производство сегодня и завтра». – С-Пб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С. 70-75.

3. Голоднов, А. И. Влияние вибрационной обработки на структуру и свойства меди / А. И. Голоднов, А. В. Сулицин, Г. Л. Хазан // Расплавы. – 2009. – №5. – С. 38-44.

4. Мысик, Р. К. Определение оптимальных параметров вибрационного воздействия на медь в процессе кристаллизации / Р. К. Мысик, А. И. Голоднов, А. В. Сулицин, С. В. Брусницын // Межрегиональный сборник научных трудов «Литейные процессы». – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – вып. 8. – С. 121-129

5. Сулицин, А. В. Определение оптимальных параметров вибрационного воздействия на бронзу марки БрКд1 в процессе кристаллизации / А. В. Сулицин, А. И. Голоднов, Р. К. Мысик, С. В. Брусницын // Литейщик России. – 2009. – №10. – С. 43-47.

6. Мысик, Р. К. Вибрационное воздействие на кристаллизующийся расплав меди / Р. К. Мысик, А. И. Голоднов, А. В. Сулицин, С. В. Брусницын // Труды V международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии». – М.: Лаборатория рекламы и печати, 2009. – С. 49-55.

7. Сулицин, А. В. Испытание технологии вибрационной обработки кадмиевой бронзы марки БрКд1 в промышленных условиях / А. В. Сулицин, А. И. Голоднов, Р. К. Мысик, С. В. Брусницын // Литейщик России. – 2009. – №11. – С. 28-31.

8. Сулицин, А. В. Влияние вибрационной обработки на структуру кадмиевой бронзы / А. В. Сулицин, А. И. Голоднов, Р. К. Мысик, С. В. Брусницын // Труды международной конференции «Создание новых материалов для эксплуатации в экстремальных условиях». – Якутск: Паблиш Групп, 2009. С. 163-166.

Подписано в печать

Формат 60x84 1/16

Бумага писчая

Офсетная печать

Тираж 120

Заказ № _____

Ризография НИЧ ГОУ ВПО УГТУ-УПИ
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19